

堆载引起临近地铁隧道的转动与错台变形计算

魏新江^{1, 2}, 洪文强¹, 魏 纲², 俞国骅³

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015;
3. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 采用 Boussinesq 解求出地面堆载工况下隧道轴线处的附加应力, 提出一个以剪切错台为主、刚体转动为辅的隧道变形模式, 结合最小势能原理推导出隧道纵向变形量、环间错台量、环间转角和环间剪切力的计算公式。通过工程实例分析, 将新方法 with 实测数据和弹性地基梁法进行比较, 验证了新方法的有效性。并研究刚体转动效应、剪切错台效应、堆载数值、隧道埋深和隧道偏移距离对隧道纵向变形量的影响。研究表明: 在地面堆载工况下, 隧道变形以剪切错台模式为主。随着刚体转动效应比例系数 j 增大, 隧道沉降量在一定范围内减小; 随着堆载数值增大, 隧道纵向沉降量增大, 沉降范围没有明显变化; 隧道沉降量随着隧道埋深的减小而增大; 随着隧道偏移距离增大, 隧道沉降量减小, 隧道水平位移则先增大后减小。

关键词: 隧道工程; 盾构隧道; 刚体转动效应; 剪切错台效应; 地面堆载; 沉降量

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)05 - 1281 - 09

Rotation and shearing dislocation deformation of subway tunnels due to adjacent ground stack load

WEI Xinjiang^{1, 2}, HONG Wenqiang¹, WEI Gang², YU Guohua³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310015, China; 3. Department of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Boussinesq's solution is adopted to calculate the additional stress at the tunnel axis caused by ground stack load. It is proposed that compared with the rigid body rotation, the shear dislocation plays a primary role for tunnel deformation modes. The formulas of the longitudinal deformation, dislocation displacement at segment joint, rotation angle at segment joint and shear force at segment joint of the tunnel are deduced according to the principle of minimum potential energy. The calculated results from the proposed method are compared with the data from the elastic foundation beam method and experiment measurement, which validates the proposed method. The effects of the rigid body rotation, shear dislocation, heap load, buried depth and the offset distance of the tunnel on the longitudinal deformation are studied. The deformation of the tunnel under ground stack load is dominated by the mode of shear dislocation. The larger the ratio coefficient j of the rigid body rotation is, the smaller the settlement of the tunnel is. The larger the load is, the larger the longitudinal settlement of the tunnel is, and the range of settlement changes little. The shallower the buried tunnel is, the larger the settlement of the tunnel is.

收稿日期: 2017 - 12 - 11; **修回日期:** 2018 - 01 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778576); 杭州市科委资助项目(20180533B07)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51778576) and Technology Project of Hangzhou Municipal Science and Technology Commission(Grant No. 20180533B07)

作者简介: 魏新江(1965 -), 男, 博士, 1987年毕业于浙江大学土木系工民建专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事地下隧道施工及运营安全风险评估方面的教学与研究工作。E-mail: weixj@zucc.edu.cn。通讯作者: 魏 纲(1977 -), 男, 现任教授、硕士生导师。E-mail: weig@zucc.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1576

The larger the offset distance is, the smaller the settlement of the tunnel is, and the horizontal displacement of the tunnel increases first and then decreases.

Key words: tunneling engineering; shield tunnel; rigid body rotation effect; shearing dislocation; ground stack load; settlement

1 引言

随着社会的发展,地铁规模正在不断扩大,因此在地铁隧道临近区域内发生的堆载工况也越来越多^[1]。运营地铁盾构隧道上部有堆载时,会对地下盾构隧道产生附加应力,破坏盾构结构的原有平衡,引起隧道应力重分布^[2],从而产生一定的纵向和横向变形,情况严重时会引起接缝张开、管片开裂和螺栓失效等现象^[3],对地铁安全造成严重影响。因此研究地面堆载对临近运营地铁盾构隧道的影响具有重要意义。

针对该工程问题,国内外学者进行了研究。地面堆载对临近地铁盾构隧道影响的研究方法主要分为:现场实测法^[4-7]、理论分析法^[8-10]、数值分析法^[11-12]和模型试验法^[13-14]。对于理论分析法,王涛等^[15]将隧道结构等效为处于土层中的弹性地基梁,基于 Winkler 模型,假定地基中任一点所受的应力只与该点的地基变形成正比。但没有考虑隧道的管片结构;王如路^[16]分析了隧道基于刚体转动方式时的纵向变形行为,提到完全的刚体转动变形模式的假定与隧道实际发生的纵向变形有较大的出入;周顺华等^[17]将盾构隧道衬砌环视为由剪切弹簧连接的弹性地基短梁,隧道纵向变形视为以纯粹的剪切错台模式进行,建立隧道变形的计算模型,利用最小势能原理计算隧道在基坑开挖工况下的纵向位移。但是剪切错台变形无法解释环缝张开的情况。目前尚没有文献综合考虑剪切错台效应和刚体转动效应,由于现有的隧道变形模式存在不足,需做进一步研究。

本文首次建立综合考虑这 2 种效应的新隧道变形模式,采用 Boussinesq 解计算地面堆载引起临近地铁盾构隧道的附加应力,采用最小势能法建立隧道变形的变分控制方程,并利用 Matlab 进行求解,推导出隧道的纵向变形量、环间剪切力、错台量和环间转角的计算公式。并选取适当的案例进行计算,将本文方法计算结果与实测数据及其他方法计算结果进行比较,以验证该方法的正确性。

2 转动与错台协同作用下的隧道变形模式

2.1 现有变形模式的不足之处

在分析土体和盾构隧道的相互作用时,往往将隧道划分为许多小的衬砌环。目前在分析隧道变形时,大多将隧道衬砌环理想化为单纯的刚体转动情况或单纯的剪切错台情况^[16-19]。

王如路^[19]推导了在刚体转动情况下,隧道环宽、直径、环缝闭合和张开量与隧道纵向附加沉降曲线半径之间的关系式。当环宽为 1 m,隧道外径为 6.2 m 时,根据该公式计算,当纵缝张开量为 6 mm 时,隧道防水已经失效,实际上,如此小的附加沉降半径在实际沉降中是存在的,防水系统并没有失效,所以单纯的刚体转动变形模式与实际情况不符。

林永国等^[20]发现打浦路越江隧道在通风井以东约 160 m 范围内形成了明显的纵向变形曲线,而且造成了隧道环向裂缝。假设隧道完全以剪切错台模式变形,那么隧道发生沉降时不会发生环缝张开的情况。因此隧道完全以剪切错台模式变形的假设也与实际情况不符。

理论分析和现场实测表明,隧道纵向变形以剪切错台模式为主,刚体转动模式为辅^[16]。

2.2 建立新的变形模式

因此本文提出一种新的盾构隧道变形模式,将衬砌环看作由剪切弹簧和抗拉弹簧连接的弹性地基短梁。综合考虑刚体转动效应和剪切错台效应,将隧道变形看成在剪切错台的基础上发生刚体转动,如图 1 所示。其中刚体转动效应和剪切错台效应对隧道沉降量的影响程度,采用两者造成衬砌环的相对沉降量大小表示,令相邻衬砌环总的相对沉降量为 δ ,刚体转动导致的衬砌环相对沉降量为 δ_1 ,剪切错台导致的衬砌环相对沉降量为 δ_2 ,三者满足 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 。这里假设 $\delta_1 = j\delta$,其中 j 为刚体转动效应比例系数,表示刚体转动效应造成的隧道纵向沉降量占总的隧道纵向沉降量的比例。当 $j = 0$ 时,该变形模式为纯粹的剪切错台模式;当 $j = 1$ 时,该变形模式为纯粹的刚体转动模式。

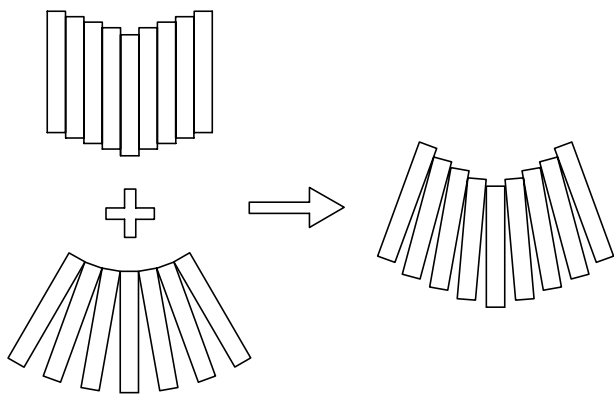


图 1 隧道变形模型示意图
Fig.1 Tunnel deformation modes

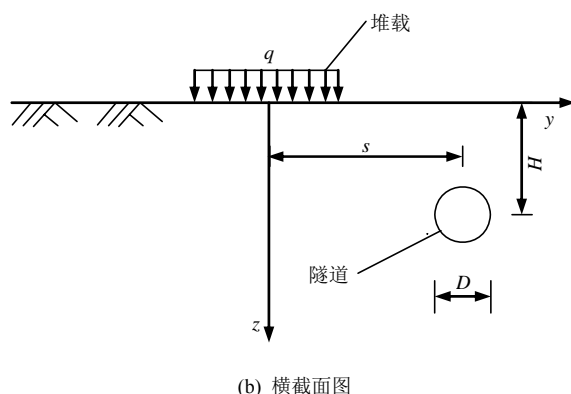


图 2 计算模型的平面图和横截面图
Fig.2 Span and cross-section view of calculation model

3 新方法的建立

3.1 地面堆载引起的隧道附加应力计算

做如下假设：(1) 假定地基土是各向同性、均匀连续的半无限弹性体，而且在深度和水平方向上都无限延伸；(2) 在计算地面堆载对土体产生的附加应力时，不考虑隧道存在的影响。

3.1.1 建立地面堆载力学模型

计算模型如图 2 所示，运营地铁上方有一矩形的地面堆载。定义如下参数： L 和 B 分别为矩形堆载的长和宽； q 为地面堆载的大小； s 为隧道轴线到堆载中心的水平距离； D 为隧道的外直径； H 为隧道轴线的埋深。

3.1.2 采用 Boussinesq 解计算附加应力^[21]

根据 Boussinesq 公式，地面堆载中的某一点 (ε, η) 的荷载 $qd\varepsilon d\eta$ ，对隧道轴线上的某一点 (x_1, y_1, z_1) 产生的水平附加应力 σ_x 和竖向附加应力 σ_z 为

$$\sigma_x = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} \left\{ \frac{(x_1 - \varepsilon)^2 z_1}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[\frac{R^2 - z_1(R + z_1)}{R^3(R + z_1)} - \frac{(x_1 - \varepsilon)(2R + z_1)}{R(R + z_1)^2} \right] \right\} \frac{3qd\varepsilon d\eta}{2\pi} \quad (1)$$

$$\sigma_z = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} \frac{z_1^3}{R^5} \frac{3qd\varepsilon d\eta}{2\pi} \quad (2)$$

其中，

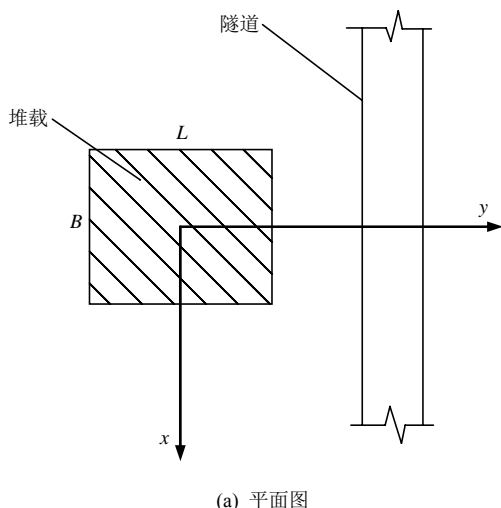
$$R = \sqrt{(x_1 - \varepsilon)^2 + (y_1 - \eta)^2 + z_1^2}$$

式中： μ 为土体的泊松比。

3.2 盾构隧道的总势能

刘晓强等^[22]在计算隧道开挖引起的地下管线响应时运用了基于最小势能原理的能量变分法。该方法借助 Matlab 计算较为方便，也容易达到精度要求。因此本文利用该方法来计算地面堆载对临近地铁盾构隧道产生的纵向位移。

将盾构隧道看成由很多个衬砌环组成，如图 3 所示，取其中 3 个衬砌环进行分析，编号分别为 $m-1$ ， m 和 $m+1$ 。



(a) 平面图

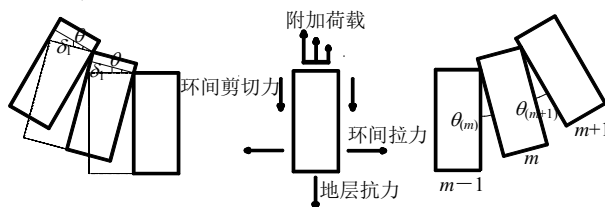


图 3 考虑刚体转动和剪切错台效应的隧道变形计算模型
Fig.3 Tunnel deformation calculation model considering the effects of rigid body rotation and shear dislocation platform

设 D_t 为环宽； θ 为环间转动角度； k_t 为隧道的环间剪切刚度； k_r 为隧道的环间抗拉刚度； E_s 为地

基土的弹性模量； $E_t I_t$ 为隧道的等效抗弯刚度； k 为地基基床系数，采用 A. B. Vesic^[23]公式计算，该公式为 $k = [0.65 E_s / (1 - \mu^2)]^{1/2} \sqrt{E_s D^4 / (E_t I_t)}$ ； $\omega_{(x)}$ 为盾构隧道位移； $S_{(x)}$ 为地基弹簧的位移，根据位移协调条件有 $S_{(x)} = \omega_{(x)}$ 。则 δ_1 为

$$\delta_1 = \frac{1}{2} D_t \sin \theta \tag{3}$$

由于 θ 无限小，有 $\delta_1 = \frac{1}{2} D_t \theta$ ，且 $\delta_1 = j \delta$ 。则

$$\theta = \frac{2j\delta}{D_t} \tag{4}$$

根据每个衬砌环的受荷载情况，其中附加荷载为 $P_{(x)}$ ，由上述提出的 Boussinesq 解求得环间剪切力为

$$F_t = \frac{1}{2} k_t [\omega_{(m+1)D_t} - \omega_{(mD_t)}] \tag{5}$$

环间拉力为

$$F_T = k_T \theta_{(m+1)} D \tag{6}$$

地层抗力为

$$F_k = kD \omega_{(x)} \tag{7}$$

参考周顺华等^[17]计算隧道的总势能方法，在该方法的基础上增加了克服环间拉力做功部分，得到盾构隧道的总势能具体由以下四部分组成：

(1) 地面堆载引起的附加荷载做功：

$$W^P = \sum_{m=0}^{m=N-1} \int_{mD}^{(m+1)D_t} \omega_{(x)} P_{(x)} dx = \int_0^{ND_t} \omega_{(x)} P_{(x)} dx \tag{8}$$

式中： $2N$ 为受地面堆载影响的隧道衬砌环数。

(2) 克服地层抗力做功：

$$W^k = - \sum_{m=0}^{m=N-1} \int_{mD}^{(m+1)D_t} \frac{1}{2} \omega_{(x)} kD \omega_{(x)} dx = - \int_0^{ND_t} \frac{1}{2} kD \omega_{(x)}^2 dx \tag{9}$$

(3) 克服环间剪切力做功：

$$W^S = - \sum_{m=0}^{m=N-1} \frac{1}{2} k_t \frac{1}{4} (\omega_{(m+1)D_t} - \omega_{(mD_t)})^2 \tag{10}$$

(4) 克服环间拉力做功：

$$W^T = - \sum_{m=0}^{m=N-1} \left[\int_{r=0}^{r=D} \frac{k_T}{D} \theta_m r \frac{\theta_m r}{2} dr + \int_{r=0}^{r=D} \frac{k_T}{D} \theta_{(m+1)} r \cdot \frac{\theta_{(m+1)} r}{2} dr \right] = - \sum_{m=0}^{m=N-1} \int_{r=0}^{r=D} \frac{k_T}{D} \theta_m^2 r^2 dr = - \sum_{m=0}^{m=N-1} \frac{k_T \theta_m^2 D^2}{3} \tag{11}$$

其中，

$$\theta_m = \frac{\delta_m}{D_t} = \frac{\omega_{[(m+1)D_t]} - \omega_{(mD_t)}}{D_t}$$

于是可得

$$W^T = - \sum_{m=0}^{m=N-1} \frac{k_T D^2}{3D_t^2} (\omega_{[(m+1)D_t]} - \omega_{(mD_t)})^2 \tag{12}$$

因此地面堆载引起的临近地铁盾构隧道的总势能为

$$E^P = W^P + W^k + W^S + W^T \tag{13}$$

3.3 假设盾构衬砌环的位移函数

盾构隧道位移左右对称，本文假设隧道位移函数^[24]如下，并按傅里叶级数展开：

$$\omega_{(x)} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{ND_t} = \mathbf{T}_n(x) \mathbf{A}^T \tag{14}$$

其中，

$$\mathbf{T}_n(x) = \left\{ 1, \cos \frac{\pi x}{ND_t}, \cos \frac{2\pi x}{ND_t}, \dots, \cos \frac{n\pi x}{ND_t} \right\}$$

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}^T$$

式中： n 为傅里叶的展开级数。

计算竖向位移时，利用式(1)计算隧道轴线上的附加应力，再求得系数矩阵 \mathbf{A} ，代入即可求出竖向位移；计算横向位移时，则利用式(2)计算隧道轴线上的附加应力，其他步骤同竖向位移计算。

3.4 变分控制方程

参考周顺华等^[17]的方法，基于能量变分法，将总势能 E^P 对各待定系数取极值，即

$$\frac{\partial E^P}{\partial \xi_i} = 0 \quad (\xi_i = a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \tag{15}$$

式中： ξ 为矩阵 \mathbf{A} 中的各个元素，也即隧道竖直位移多项式的系数。

对式(15)求解可得控制方程：

$$\left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \left(\frac{1}{4} k_t + \frac{2k_T D^3}{3D_t^2} \right) \frac{\partial \{ \omega_{[(m+1)D_t]} - \omega_{(mD_t)} \}}{\partial \xi_i} \{ \mathbf{T}_n[(m+1)D_t] - \mathbf{T}_n(mD_t) \} + \int_0^{ND_t} kD \frac{\partial \omega_{(x)}}{\partial \xi_i} \mathbf{T}_n(x) dx \right\} \mathbf{A}^T = \int_0^{ND_t} P(x) \{ \mathbf{T}_n(x) \}^T dx \tag{16}$$

将式(16)表达为矩阵形式：

$$([K_t] + [K_s])\{A\}^T = \{P_n\}^T \quad (17)$$

其中，

$$[K_t] = \sum_{m=-N}^{N-1} \left(\frac{1}{4}k_t + \frac{2k_T D}{3D_t^2} \right) \{T_n[(m+1)D_t]^T - T_n(mD_t)^T\} \{T_n[(m+1)D_t] - T_n(mD_t)\} \quad (18)$$

$$[K_s] = kDL \begin{bmatrix} 2 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 0 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{P_n\}^T = \int_0^{ND_t} P(x)\{T_n(x)\}^T dx$$

式中： $[K_t]$ 为隧道环间刚度矩阵， $[K_s]$ 为土体刚度矩阵， $\{P_n\}^T$ 表示自由土体位移和隧道衬砌环的相互作用效应。

由式(17)计算可得到待定系数矩阵 A ，相邻盾构管片之间位移差值即相对沉降量 $\Delta\omega$ 为

$$\Delta\omega = \omega[(m+1)D_t] - \omega(mD_t) \quad (19)$$

相邻盾构管片之间的剪切力 Q 为

$$Q = \{\omega[(m+1)D_t] - \omega(mD_t)\} jk_t \quad (20)$$

取 10 阶的刚度矩阵 $[K_t]$ 和 $[K_s]$ 即可满足计算精度，上述算法通过 Matlab 编程进行数值计算。

4 工程实例分析

选取范焘焘等^[25]中的工程实例，利用本文方法计算地铁盾构隧道的纵向位移，与陈郁和李永盛^[24]的实测数据以及基于该案例的弹性地基梁法^[23]的计算结果进行比较，来验证本文方法的正确性。

4.1 地面堆载工程案例

小涑港河道位于上海地铁 9 号线中春路—九亭区间盾构段最上方，两者在平面上垂直相交，由于嘉闵高架的施工，将河道堆填作为存梁场地，导致下方地铁产生较大的不均匀沉降^[25]。河道长 $L = 200$ m、宽 $B = 24$ m，堆载 $q = 161.5$ kPa，荷载中心与隧道轴线的水平距离 $s = 0$ m，隧道埋深 $H = 8.1$ m，管片外径 $D = 6.2$ m，环宽 $D_t = 1.2$ m，环间剪切刚度 $k_t = 4 \times 10^5$ kN/m^[17]，环间抗拉刚度 $k_T = 8.6 \times 10^5$ kN/m^[26]，地基土的弹性模量 $E_s = 9 \times 10^3$ kPa，隧道

的等效抗弯刚度 $E_t I_t = 1.087 \times 10^8$ kN/m^{2[27]}。范焘焘等^[25]研究中土层②和土层③的土体重度分别为 18.7 和 17.2 kN/m³，泊松比分别为 0.31 和 0.32，弹性模量分别为 15 和 9 MPa，而隧道绝大部分处于土层③，少部分处于土层②中，所以本文中土体重度取 $\gamma = 17.5$ kN/m³，泊松比取 $\mu = 0.32$ ，弹性模量取 $E_s = 9 \times 10^3$ kPa。N 取 375，j 取 0.08。

4.2 计算结果分析

图 4 为采用本文方法计算得到的隧道纵向沉降量与实测数据和弹性地基梁法计算结果的对比如。由图 4 可知，隧道纵向沉降呈正态分布，隧道中心处纵向沉降最大，向两边逐渐减少。本文方法相对于弹性地基梁法与实测数据更为接近。范焘焘等^[25]说明了受河道加载影响而产生沉降的隧道范围为 3~4 倍的加载宽度^[25]。即为 $[-40$ m, 40 m]，在该区间内，本文计算结果与实测数据吻合度较高；而在 $[-80$ m, -40 m] 和 $[40$ m, 80 m] 这 2 个区间内，实测的沉降量比本文计算的大很多，这是因为盾构隧道受堆载之外的因素影响产生了一定的沉降。实测、本文方法和弹性地基梁法得到的隧道最大沉降量分别为 28.27、26.92 和 20.33 mm。

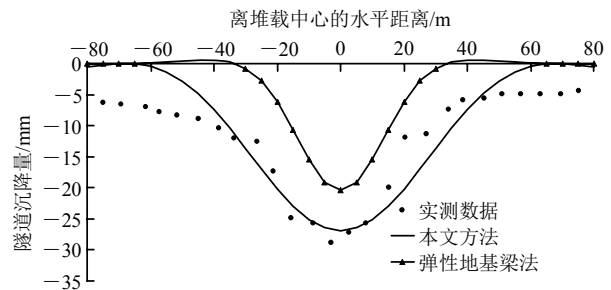


图 4 隧道纵向沉降量比较

Fig.4 Comparison of settlements of shield tunnel

除了隧道的纵向沉降量，本文方法还可以计算隧道的环间错台量、环间转角变形和环间剪切力，如图 5, 6 所示。隧道纵向沉降最大值附近的管片基本不发生错台变形和刚体转动变形，环间剪切力值也很小；而在隧道水平位移的反弯点处，隧道的剪切错台量、环间转角和环间剪切力值达到最大。其中环间错台量、环间转角和环间剪切力的变化趋势相同，最大环间错台量达到 0.74 mm，最大环间转角达到 0.003 1°，最大环间剪切力达到 295.56 kN。本工程中，相邻隧道环之间用 17 颗 M30 螺栓连接，其剪切强度极限为 665.36 kN。计算得到的最大剪力值并没有超过该极限值。

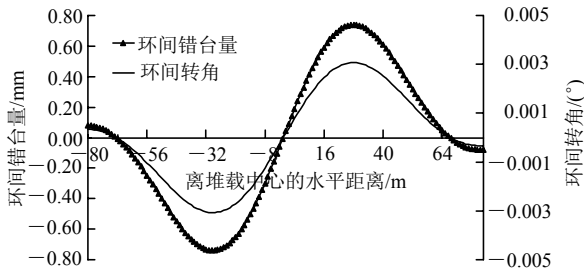


图5 隧道环间错台量和环间转角变形曲线

Fig.5 Dislocation platform and corner of shield tunnel duct pieces

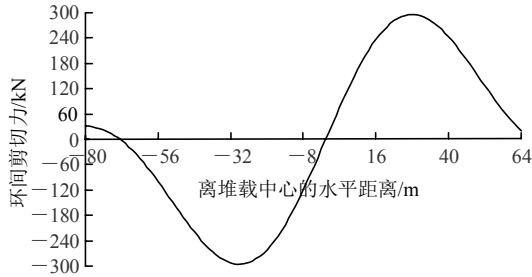


图6 隧道纵向环间剪切力

Fig.6 Shearing force between shield tunnel rings

4.3 刚体转动效应和环间错台效应的影响分析

改变刚体转动效应和剪切错台效应对隧道纵向沉降量的影响大小，即改变 j 的大小，计算隧道的纵向沉降量，结果见图 7。如图 7 所示，随着 j 值的增大，刚体转动效应越明显，隧道的沉降量在一定范围内变小。经过多次试算，在该案例中，当 j 取值 0.08 时，计算结果与实际情况相符。

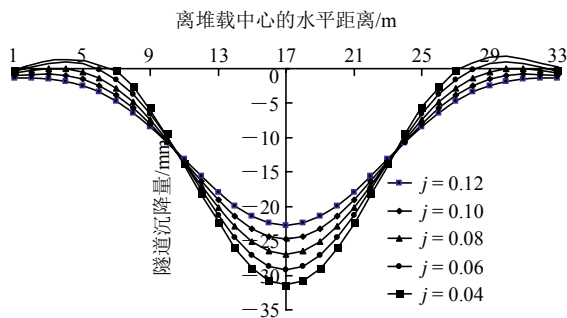


图7 j 值对隧道竖向位移曲线的影响

Fig.7 Influence of j on vertical displacement of tunnel

5 隧道位移单因素影响分析

模型参数如下： $L = 200$ m， $B = 24$ m， $q = 161.5$ kPa， $s = 0$ m， $H = 8.1$ m， $D = 6.2$ m， $D_t = 1.2$ m， $k_t = 4 \times 10^5$ N/m， $k_T = 8.6 \times 10^5$ kN/m， $E_s = 9$ MPa， $E_t I_t = 1.087 \times 10^8$ kN/m²， $\mu = 0.32$ ， $j = 0.08$ 。计算分析堆载数值、隧道埋深和隧道偏移距离对隧道变形

量的影响规律。

5.1 堆载数值大小对隧道沉降量的影响分析

在其他参数保持不变的情况下，以地面堆载数值大小 q 为控制变量，分别在 $q = 60, 80, 100, 120$ 和 140 kPa 五种工况下，计算隧道沉降量，分析 q 值改变对隧道沉降量的影响规律。

图 8 为 5 种不同工况下隧道沉降量对比图。如图 8 所示，随着 q 不断增加，隧道的沉降量在不同程度上增加，隧道最大沉降量则不断变大，隧道中间沉降变化较大，范围没有明显变化。当 q 大于 120 kPa 时，隧道最大沉降值超过控制值 20 mm^[28]。本文结果与吴庆和杜守继^[13]的研究结果“堆载量越大，隧道变形越大，而且在堆载的正下方，隧道拱顶垂直附加位移达到最大值”相一致。

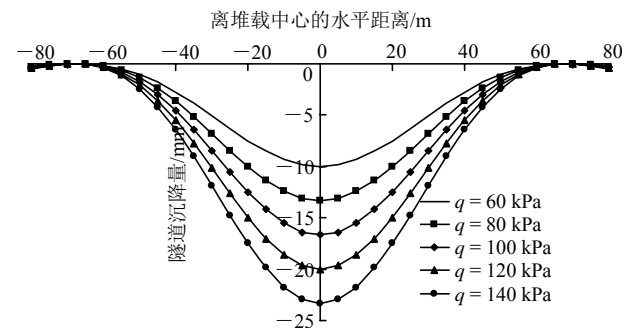


图8 不同q时隧道沉降量对比

Fig.8 Comparison of vertical displacements of shield tunnel with different values of q

图 9 为隧道中心($y = 0$)处的最大沉降量随 q 值增大的变化图。如图 9 所示，隧道中心沉降量随着 q 值的增大近似呈线性增加。

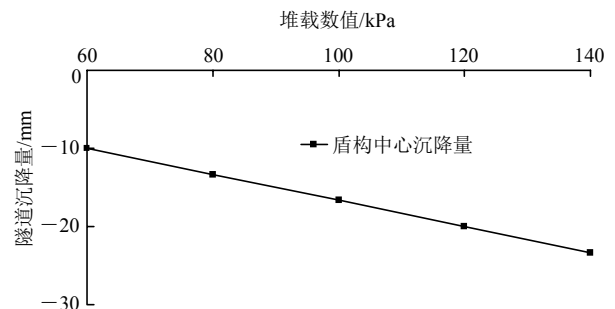


图9 不同q时盾构隧道中心最大沉降量变化

Fig.9 Variation of maximum settlement in center of shield tunnel with different values of q

5.2 隧道埋深对隧道沉降量的影响分析

在其他参数保持不变情况下，以隧道埋深 H 为控制变量，分别在 $H = 10, 15, 20, 25$ 和 30 m 五种工况下，计算隧道的沉降量，分析 H 改变对隧道

沉降量的影响规律。

图 10 为 5 种工况下计算得到的隧道沉降量对比图。如图 10 所示，随着 H 不断增加，隧道的最大沉降量不断减小，最大沉降量从 26.14 mm 降到 17.98 mm，但隧道变形影响范围在扩大，表明埋深较大的隧道对地面堆载的抵抗能力强。

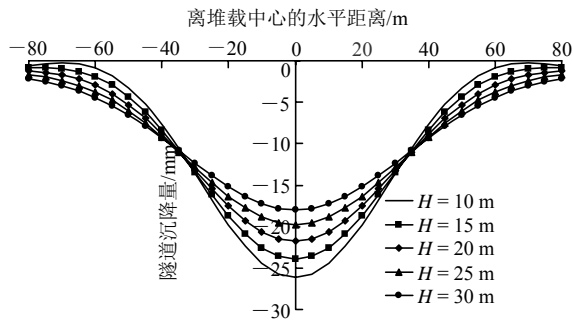


图 10 不同 H 时隧道沉降量对比

Fig.10 Comparison of vertical displacements of shield tunnel with different values of H

5.3 隧道偏移距离对隧道变形量的影响分析

在其他参数保持不变情况下，以荷载中心离隧道中心距离 s 为控制变量，在 $s = 80, 90, 95, 100, 105$ 和 110 m 等多种工况下，计算隧道沉降量，分析 s 改变对隧道纵向变形量和横向变形量的影响规律。

图 11 为隧道沉降量的对比图。由图 11 可知，随着 s 不断增加，隧道的总体沉降量不断减小，沉降影响范围为 $(-60$ m, 60 m)，基本保持不变，在沉降范围内隧道中部的沉降量变化大，两端变化较小。

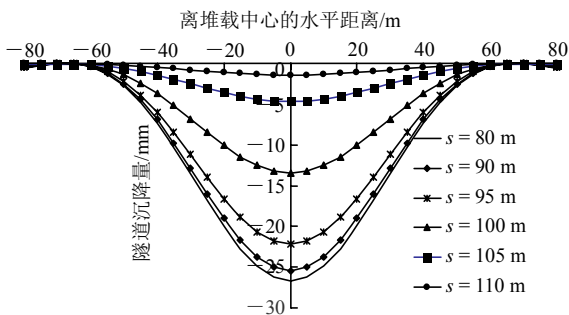


图 11 不同 s 时隧道沉降量对比

Fig.11 Comparison of vertical displacement of shield tunnel with different values of s

图 12 为盾构隧道最大沉降量随 s 的变化图，如图所示，当 $s = 0$ 的时候，隧道的最大沉降量为 26.9 mm，大于隧道沉降控制值 20 mm^[28]。随着 s 的增大，隧道最大沉降量略减小；当 $s < 70$ m 时隧道最大沉降量基本没有变化，这是因为隧道处于堆载

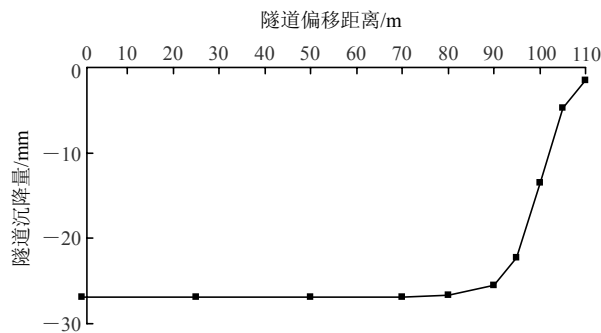


图 12 不同 s 时隧道最大沉降量变化

Fig.12 Variation of maximum settlements of shield tunnel with different values of s

下方投影范围内，距离投影边界有一定的距离；当 s 处于 $[70$ m, 90 m] 时，隧道最大沉降量以较小趋势在减小；当 $s > 90$ m 时最大沉降量急剧降低。这是因为隧道处于堆载投影边界处，沉降量减小程度增大。戴宏伟等^[11]在分析堆载位置对隧道最大变形的影响时，也获得了类似的特征曲线，结论与本文相似。

图 13 为隧道水平位移随 s 变化曲线，如图所示，隧道中部的沉降量变化较大，两边沉降量较小。当 $s = 0$ 时，由于堆载的对称性，隧道的横向水平位移为 0；当 $s < 100$ m 时，随着 s 的增大，隧道总体水平位移不断增大；当 $s > 100$ m 时，隧道总体水平位移随着 s 的增大而减小。

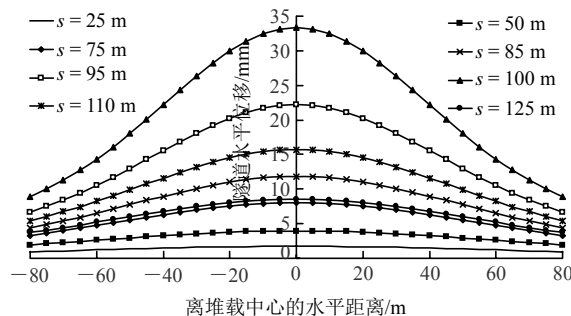


图 13 不同 s 下隧道水平位移变化曲线

Fig.13 Horizontal displacement curves of shield tunnel with different values of s

图 14 为不同 s 下隧道最大水平位移变化曲线，如图所示，当 s 在 $[0$ m, 100 m] 范围内增大时，隧道一直处于堆载下方，但隧道两边存在的抵消作用在逐渐减小，隧道的水平位移开始增大，并在 $s = 100$ m 时达到峰值；当 $s > 100$ m 后，随着 s 的增大，荷载距离隧道变远，影响变小，隧道的水平位移则开始减小。

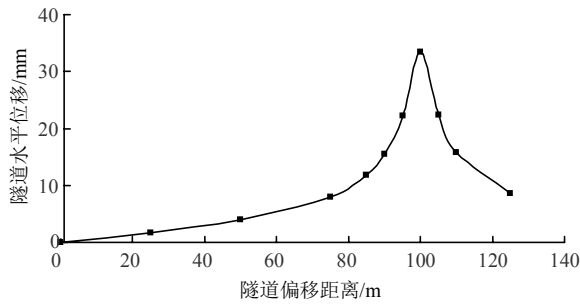


图 14 不同 s 时隧道最大水平位移变化曲线

Fig.14 Variation curve of maximum horizontal displacement of shield tunnel with different values of s

6 结 论

(1) 本文建立了一种综合考虑刚体转动效应和剪切错台效应的隧道变形模式，能够计算得到地面堆载引起的盾构隧道纵向位移，以及盾构衬砌环之间的错台量、环间转角以及环间剪切力，由此可以判断地面堆载工况下隧道结构的安全性。

(2) 本文方法计算结果与实测数据在数值和趋势上都较为吻合，与弹性地基梁方法对比发现其计算的结果偏小。

(3) 研究表明，刚体转动效应越明显，隧道的沉降量在一定的范围内变小；随着堆载数值增大，隧道纵向沉降量增大，隧道最大沉降量呈线性增加；随着隧道埋深减小，隧道沉降量增大，沉降范围没有明显变化；随着隧道偏移距离增大，隧道沉降量减小，隧道水平位移则先增大后减小。

(4) 隧道纵向沉降最大值附近的管片基本不发生错台变形和刚体转动变形，环间剪切力值也很小；而在隧道水平位移的反弯点处，隧道的剪切错台量、环间转角和环间剪切力值达到最大。

本文在考虑剪切错台效应和刚体转动效应对隧道纵向变形影响时，简单地将两者对隧道产生的纵向相对变形量视为线性关系。2 种效应对隧道产生的相对变形量之间的关系需做进一步研究。

参考文献(Reference):

[1] 杭州杭港地铁有限公司. 杭州地铁 1 号线地铁保护区巡查月度报告[R]. 杭州: 杭州杭港地铁有限公司, 2014.(Hangzhou Hangzhou-Hong Kong MTR Corporation. Limited monthly report of Metro Line 1 inspection of Hangzhou Metro Line[R]. Hangzhou: Hangzhou Hangzhou-Hong Kong MTR Corporation., 2014.(in Chinese))

[2] 孙 钧. 城市地下工程活动的环境土工学问题(下)[J]. 地下工程与隧道, 2000, (1): 2 - 7.(SUN Jun. Environmental geotechnical problems of urban underground engineering activities[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000, (1): 2 - 7.(in Chinese))

[3] 杨雨荷, 周 彪, 谢雄耀. 邻近基坑施工作业下盾构隧道横向变形及开裂特性研究[J]. 岩石力学和工程学报, 2016, 35(增2): 4 082 - 4 093. (YANG Yuhe, ZHOU Biao, XIE Xiongyao. Study on transverse deformation and cracking property of shield-driven tunnel induced by adjacent excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 4 082 - 4 093.(in Chinese))

[4] 邵 华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1 036 - 1 043.(SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1 036 - 1 043.(in Chinese))

[5] HUANG H, ZHANG D. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: characterization and field application[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301 - 312.

[6] 徐志发, 王颖轶, 董越鹏, 等. 地面超载对大型盾构施工扰动位移的影响[J]. 交通建设与管理, 2010, (5): 170 - 180.(XU Zhifa, WANG Yingzhi, DONG Yuepeng, et al. Influence of ground overload on the displacement of large shield construction[J]. Traffic Construction and Management, 2010, (5): 170 - 180.(in Chinese))

[7] 王 旭. 地面过量堆土对某地铁隧道的影响及结构安全分析[J]. 城市建设理论研究, 2013, (12): 1 - 7.(WANG Xu. Analysis of the influence of ground excess soil pile on a metro tunnel and its structural safety[J]. Theoretical Research on Urban Construction, 2013, (12): 1 - 7.(in Chinese))

[8] 李春良, 王国强, 赵凯军, 等. 地面荷载作用盾构隧道纵向力学行为[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(增 2): 180 - 184.(LI Chunliang, WANG Guoqiang, ZHAO Kaijun, et al. Vertical mechanical behavior of shield tunnel under loads on ground surface[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2011, 41(Supp.2): 180 - 184.(in Chinese))

[9] 姜启元, 管攀峰, 叶 蓉. 软土盾构隧道的纵向变形分析[J]. 地下工程与隧道, 1999, (4): 2 - 6.(JIANG Qiyuan, GUAN Panfeng, YE Rong. Analysis of longitudinal deformation of shield tunnel in soft soil[J]. Underground Engineering and Tunnel, 1999, (4): 2 - 6. (in Chinese))

[10] 候 芳. 均布荷载作用下温克勒弹性地基梁解析解及其在盾构隧道纵向计算中的应用[硕士学位论文][D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.(HOU Fang. Analytical solution of Winkler elastic foundation beam under uniform load and its application in longitudinal

- calculation of shield tunnel[M. S. Thesis][D]. Qindao: Qingdao Technological University, 2009. (in Chinese))
- [11] 戴宏伟, 陈仁朋, 陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 313 - 317.(DAI Hongwei, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Study on the influence of new construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 313 - 317.(in Chinese))
- [12] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机制及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1 092 - 1 101.(WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1 092 - 1 101.(in Chinese))
- [13] 吴庆, 杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 57 - 66.(WU Qing, DU Shouji. Model test on influence of ground heaped load on existing shield tunnel structure[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 57 - 66.(in Chinese))
- [14] 张明告, 周顺华, 黄大维, 等. 地表超载对地铁盾构隧道的影响分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2 271 - 2 278.(ZHANG Minggao, ZHOU Shunhua, HUANG Dawei, et al. Analysis of influence of surface surcharge on subway shield tunnel under[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2 271 - 2 278. (in Chinese))
- [15] 王涛, 李浩, 徐日庆. 上方大面积加(卸)载引起盾构隧道的变形分析[J]. 现代交通技术, 2008, 5(3): 29 - 31.(WANG Tao, LI Hao, XU Riqing. Analysis of deformation of shield tunnel when vertical loading and unloading[J]. Modern Transportation Technology, 2008, 5(3): 29 - 31.(in Chinese))
- [16] 王如路. 上海地铁盾构隧道纵向变形分析[J]. 地下工程与隧道, 2009, (4): 1 - 6.(WANG Rulu. Longitudinal deformation analysis for Shanghai subway tunnel constructed by shield method[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009, (4): 1 - 6.(in Chinese))
- [17] 周顺华, 何超, 肖军华. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量算法[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 53 - 60.(ZHOU Shunhua, HE Chao, XIAO Junhua. Energy method for calculating deformation of adjacent shield tunnels due to foundation pit excavation considering step between rings[J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 53 - 60.(in Chinese))
- [18] SHEN Shuilong, WU Huaina, CUI Yujun, et al. Long-term settlement behavior of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 309 - 323.
- [19] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征研究[J]. 地下工程与隧道, 2009, (1): 1 - 6.(WANG Rulu. Longitudinal deformation and deformation influencing factors analysis for Shanghai subway tunnel constructed by shield method[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009, (1): 1 - 6.(in Chinese))
- [20] 林永国, 廖少明, 刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨[J]. 地下空间, 2000, 20(4): 264 - 267.(LIN Yongguo, LIAO Shaoming, LIU Guobin. Investigation on micro-mechanism for damage of contaminated soil by landslide[J]. Underground Space, 2000, 20(4): 264 - 267.(in Chinese))
- [21] 龚晓南, 谢康和. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 65 - 78.(GONG Xiaonan, XIE Kanghe. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014: 65 - 78.(in Chinese))
- [22] 刘晓强, 梁发云, 张浩, 等. 隧道穿越引起地下管线竖向位移的能量变分分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(增 2): 217 - 222, 231.(LIU Xiaoqiang, LIANG Fayun, ZHANG Hao, et al. Energy variational solution for settlement of buried pipeline induced by tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Supp.2): 217 - 222, 231.(in Chinese))
- [23] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solids[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1961, 87(2): 35 - 53.
- [24] 陈郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91 - 94.(CHEN Yu, LI Yongsheng. The calculation method of the uplift of the lower tunnel caused by excavation unloading[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 91 - 94.(in Chinese))
- [25] 范焱焱, 郭晓航, 邓指军, 等. 正上方加卸载对盾构隧道变形的影响分析[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 107 - 109.(FAN Zhuangzhuang, GUO Xiaohang, DENG Zhijun, et al. Deformation analysis of shield tunnel with loading and unloading above[J]. Construction Technology, 2014, 43(7): 107 - 109.(in Chinese))
- [26] 周宁, 袁勇. 越江盾构隧道纵向变形曲率与管环渗漏的关系[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 1 446 - 1 451.(ZHOU Ning, YUAN Yong. Correlation of cross-river shield tunnel between longitudinal deformation curvature and segment leakage[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(11): 1 446 - 1 451.(in Chinese))
- [27] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 临近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1 373 - 1 380.(ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1 373 - 1 380.(in Chinese))
- [28] 上海市市政工程管理局. 上海市政法(94)第 854 号上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S]. 上海: 上海市市政管理局, 1994.(Shanghai Municipal Engineering Administration. Interim provisions of Shanghai Municipality on the administration of the technical management of subway construction and protection of Shanghai Metro Line 854th(94)[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Administration (notice), 1994.(in Chinese))